

CLT-HIRSIRAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALINEN ESITUTKIMUS

Hyvärilä Jari

Opinnäytetyö
Tekniikan ala
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Insinööri (AMK)

2017

Tekniikan ala
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jari Hyvärilä	Vuosi	2017
Ohjaaja(t)	Mikko Vatanen		
Toimeksiantaja	Centria-ammattikorkeakoulu Oy		
Työn nimi	CLT-hirsirakenteen rakennusfysikaalinen esitutkimus		
Sivu- ja liitesivumäärä	39 + 2		

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Timber-hirsi Oy:n uuden CLT-massiivipuuta sisältävän painumattoman yhdistelmähirsirakenteen kosteus- ja lämpökäyttäytymistä. Lisäksi tavoitteena oli saada selville mittausantureille järkevä etäisyys hirren pinnasta myöhemmin rakennettavan koetalon mittauksia varten. Vertailun vuoksi testissä mitattiin myös normaalin hirsirakenteen kosteus- ja lämpökäyttäytymistä.

Opinnäytetyö toteutettiin laadullisella tutkimusmenetelmällä. Ennen varsinaisten koeseinien tutkimusta perehdyttiin asiaankuuluvaan teoriaan, jota avuksi käyttäen tehtiin koeseinien testi. Koeseinien tutkimuksen jälkeen analysoitiin koeseinistä saatua dataa erityisesti seinien kosteusteknisen toiminnan osalta. Opinnäytetyö toimi esitutkimuksena varsinaisen CLT-hirsiyhdistelmästä rakennettavan koetalon tutkimusta varten.

Lyhyen testijakson tuloksista todettiin, että CLT-hirsirakenteella voi olla kosteus- ja lämpöteknisesti etua verrattuna normaaliin hirsirakenteeseen. Mittausjärjestelmän käytettävyys ja toimivuus varmistettiin esitutkimuksella ja lisäksi havaittiin, että mittausantureita voidaan kiinnittää varsinaisessa koetalon tutkimuksessa käytännössä minkä pituisella ruuvilla vaan, eikä siitä aiheudu liiallista häiriötä tutkimustuloksiin.

Technology, Communication and
Transport
Degree Programme in Civil Engineering
Bachelor of engineering

Author	Jari Hyvärilä	Year	2017
Supervisor	Mikko Vatanen		
Commissioned by	Centria University of Applied Sciences		
Subject of thesis	Structural Physical Pilot Study of the CLT Timber Structure		
Number of pages	39 + 2		

The aim of the thesis was to research the moisture and heat behaviour of the new log structure which contains CLT massive wood. In addition, the aim was to find a reasonable distance from the log surface for the measurement probes for the subsequent test house research. For comparison the moisture and heat behaviour of the normal log structure were also measured in the test.

The thesis was carried out by using a qualitative research method. Before the actual research of the test walls, the relevant theory was studied, which was used to help in the research of the test walls. After the research of the test walls, the data was analysed especially for the moisture technical operation of the walls. The thesis was a preliminary research for the actual research of the test house, which is built from the CLT timber combination.

It was stated about the results of the short test period that on the CLT timber structure there can be an advantage compared to the normal timber structure humidity and thermal technically. The usability and the functionality of the measuring system was verified by a preliminary research. In addition, it was also found that the measuring probes can be attached to the actual test with virtually screws, but no excessive disturbance to the results of the research.

Key words

CLT, log structure, wood construction, building physics

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 CENTRIA JA FCLT-HANKE	9
2.1 Centria-ammattikorkeakoulu Oy	9
2.2 FCLT-hanke.....	9
3 PUU RAKENNUSMATERIAALINA	11
3.1 Puun asema rakentamisessa.....	11
3.2 Puun fysikaalinen toiminta	12
3.2.1 Rakennuksen painesuhteet	12
3.2.2 Lämpötekkinen toiminta	14
3.2.3 Kosteustekkinen toiminta	15
3.3 CLT	17
3.4 Hirsi.....	19
4 AIKAISEMMAT RAKENNUSFYSIKAALISET TUTKIMUKSET	21
5 TESTISUUNNITELMA	22
5.1 Tausta.....	22
5.2 Koeseinien rakentaminen	24
5.3 Mittausjärjestelmä	26
5.4 Mittausdatan keruumenetelmä.....	28
6 TULOKSET	30
6.1 Koeseinien kosteusteknisen mittauksen tulokset.....	30
6.2 Koeseinien lämpötekkinen mittauksen tulokset	33
6.3 Tulosten analysointi	33
7 POHDINTA	35
LÄHTEET.....	37
LIITTEET	39

ALKUSANAT

Haluan kiittää opinnäytetyön aiheen mahdollistamisesta Centria-ammattikorkeakoulua sekä opinnäytetyön ohjaajaa Mikko Vatasta ja lehtori Leena Ruokasta asiantuntevista ja hyvistä neuvoista. Lisäksi haluan kiittää kaikkia niitä, jotka olivat mukana auttamassa tämän opinnäytetyön valmistumisessa.

KÄYTETYT MÄÄRITELMÄT

Absoluuttinen kosteus tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn määrää grammoina suhteessa ilmakeuutiometriä kohden. Mitä lämpimämpää ilma on, sitä suuremman määrän vesihöyryä se voi sisältää. (Siikanen 2014, 68.)

Diffuusiolla tarkoitetaan rakennustekniikassa yleensä kosteuden liikkumista vesihöyrynä rakenteen läpi. Diffuusion suunta on yleisesti lämpimästä tilasta kylmempään. Diffuusiota tarkastellessa tärkein ominaisuus on ilman kosteusero. Kosteus pyrkii diffusoitumaan ulko- ja sisäilman erottavan rakenteen läpi tilaan, jossa ilman vesihöyryn osapaine on pienempi. Tästä syystä diffusoituminen voi tapahtua myös kylmemmästä ilmasta lämpimämpään. (Siikanen 2014, 71.)

Kastepiste on lämpötila, jossa ilmassa esiintyvä kosteus tiivistyy vedeksi eli kondensoituu. Tällöin ilman kosteus saavuttaa kyllästyskosteuden. (Siikanen 2014, 70.)

Kondensoituminen on ilmiö, jossa vesihöyry tiivistyy vedeksi ainekerroksen pinnalle tai sen sisään ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. Vesihöyry tiivistyy rakenteissa aina ympäröivää ilmaa kylmemmälle pinnalle, jos kastepiste ylittyy. Kosteuden tiivistymistä voi aiheuttaa esimerkiksi kylmäsiilat, höyrynsulun puutteellisuus tai rakenteen höyrynsulussa olevat reiät. (Siikanen 2014, 72.)

Kyllästyspaineeksi kutsutaan suurinta vesihöyryn aikaansaamaa painetta tietyssä lämpötilassa. Mitä suurempi lämpötila on, sitä suurempi on myös kyllästyspaine. Kyllästyskosteus on suoraan yhteydessä kyllästyspaineeseen. (Siikanen 2014, 70.)

Suhteellinen kosteus on rakennustekniikan näkökulmasta yleisin käsite kosteudesta. Se ilmoittaa prosentteina tietynlämpöisen ilman sisältämän vesihöyryn määrän enimmäisvesihöyrymäärästä, jonka ilma voi sisältää. Kun ilman sisältämä suurin mahdollinen vesihöyrymäärä ylittyy, se tiivistyy vedeksi. Suhteellinen kosteus merkitään prosentteina (RH %). Suhteellinen kosteus ei voi ylittää 100 prosenttia. Suhteellinen kosteus on tavallisesti lämmityskaudella lämpimässä huonetilassa 20–40 % välillä, kun taas samaan aikaan ulkoilman suhteellinen

kosteus on suunnilleen 85 %. Kesällä suhteellinen kosteus on ulkoilmassa yleisesti 50–60 %. Suhteellisesta kosteudesta huolimatta ilman kosteuspitoisuus voi vaihdella suurestikin. Esimerkiksi jos ulkolämpötila on $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 90 % on ilman kosteuspitoisuus vain $0,8\text{ g/m}^3$. Samaan aikaan sisätilan ollessa $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellisen kosteuden 40 % on sisäilman kosteuspitoisuus $6,9\text{ g/m}^3$. (Siikanen 2014, 69.)

Vesihöyryn konvektiolla tarkoitetaan vesihöyryn siirtymistä kaasuseoksen mukana sen liikkeessä kokonaispaine-eron vaikutuksesta. Rakennuksessa konvektio on huokoisten ja hyvin ilmaa läpäisevien ainekerrosten läpi tapahtuvaa ilman virtausta. (Siikanen 2014, 71.)

Vesihöyryn kyllästyskosteus (kg/m^3) on tila, jossa ilma sisältää enimmäismäärän vesihöyryä (RH 100 %). Tietyn lämpöinen ilma pystyy sisältämään tietyn määrän vesihöyryä. (Siikanen 2014, 70.)

Vesihöyryn osapaineeksi kutsutaan painetta, jonka ilman sisältämä vesihöyry aiheuttaa. Vesihöyrypitoisuuden ja lämpötilan lisäys kasvattaa vesihöyryn osapainetta. (Siikanen 2014, 70.)

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö toimi esitutkimuksena myöhemmin painumattomasta hirrestä rakennetun koetalon mittausta varten. Tutkimusongelmana oli selvittää CLT-hirsirakenteen kosteuden kestävyyttä ja lämmön kulkeutumista rakenteessa. CLT-hirsirakenteesta löytyy useampi liimasauma CLT-elementin kerrosten sekä CLT:n ja itse hirren välistä. Näiden liimasaumojen vaikutusta täytyi tutkia, jotta voidaan todeta, onko CLT-hirsirakenne kosteuden kannalta turvallisempi kuin normaali hirsirakenne. Tavoitteena oli saada todistettua CLT-hirren toimivuus ja turvallisuus kosteus- ja lämpöteknisesti.

Varsinaiseen tutkimukseen liittyvässä koetalossa käytetty painumaton hirsi oli uudennlainen CLT:llä vahvistettu hirsirakenne ja opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia rakenteen kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta sekä niiden eroa normaaliin hirsirakenteeseen. Työn keskeisimmät mitattavat suureet olivat seinärakenteiden lämpötila ja kosteuspitoisuus sekä ulko- ja sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Koetalossa mitattiin lisäksi myös painumista, mutta esitutkimuksessa sitä ei ollut mahdollista tutkia. Lisäksi työn tarkoituksena oli varmistua mittalaitteiden käytettävyydestä ja toimivuudesta sekä niiden sijoittelusta itse koetaloon.

Aihe valikoitui työelämäyhteyksien kautta. Toimeksiantajana toimi Centria-ammattikorkeakoulu Oy ja opinnäytetyö oli hyödyksi painumattomasta hirrestä valmistetun koetalon tutkimuksessa. Varsinainen koetaloon liittyvä tutkimus oli osa FCLT-hanketta, jossa Centria-ammattikorkeakoulu oli mukana.

2 CENTRIA JA FCLT-HANKE

2.1 Centria-ammattikorkeakoulu Oy

Opinnäytetyön toimeksiantaja Centria-ammattikorkeakoulu Oy on Kokkolassa, Ylivieskassa ja Pietarsaareissa toimiva ammattikorkeakoulu. Korkeakouluopetuksen lisäksi Centria on vahvasti mukana myös tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminnassa ja TKI-toiminta onkin tunnustettu Centrian vahvuudeksi, myös valtakunnallisen menestyksenkin mukaan. Centria Tutkimus ja kehityksen tarkoituksena on kehittää alueen yritysten ja organisaatioiden osaamista niiden toiminnan ja kilpailukyvyn vahvistamiseksi. Tavoitteena on luoda tietoa ja osaamista alueen elinkeino- ja työelämän käyttöön sekä tarjota työelämänlähtöistä opetusta TKI-toiminnan ja opetuksen yhteistoiminnan kautta.

Centria-ammattikorkeakoulun tutkimus-, kehitys- ja innovaatioyksikkö Centria tutkimus ja kehitys työllistää noin 70 henkilöä. Tutkimus- ja kehityshankkeita on käynnissä vuosittain noin 60. Vuonna 2015 Centrian TKI-toiminnan kokonaisvolyymi oli 4,9 miljoonaa euroa, josta ulkopuolisen rahoituksen osuus oli 2,3 miljoonaa euroa. Suurimmat tutkimus- ja kehityshankkeiden julkiset rahoittajat olivat Tekes, EU (EAKR, ESR, Interreg ja komissio), maakuntien liitot ja ELY-keskukset. Ammattikorkeakoulu oli mukana 11 Tekes-hankkeessa, joiden hankeaikainen laajuus Centrian osalta oli yhteensä 5,5 miljoonaa euroa. Kansainvälisiä hankkeita oli vuonna 2015 käynnissä 12 kpl, joiden hankeaikainen laajuus Centrian osalta oli yhteensä 4,9 miljoonaa euroa. (Centria-ammattikorkeakoulu 2017.)

2.2 FCLT-hanke

Future possibilities for CLT on hanke, jossa Centria tukee hankeyritysten tuotekehitystä mm. testauksen ja standardiselvitysten avulla. Tavoitteena on tukea ja nopeuttaa yritysten puurakenteiden tuotekehitysprosessia. Tavoitteena on myös kehittää uusia rakenneratkaisuja ja saada CLT käyttöön markkinoilla eri käyttökohteissa sekä näin lisätä tietoutta CLT:stä ja sen eduista rakennusmateriaalina. Hankeyrityksillä on lisäksi myös mahdollisuus vertailla omia rakenneratkaisuja CLT-rakenteeseen. FCLT-hankkeen toteutusaika on 1.9.2015-31.5.2018 ja bud-

jetti on 1,3 miljoonaa euroa. Hankkeessa on mukana Centria-ammattikorkeakoulu Oy:n lisäksi Luulajan teknillinen yliopisto, Lapin ammattikorkeakoulu Oy, Kemin Digipolis Oy ja SP Ruotsin tekninen tutkimuslaitos. (Centria-ammattikorkeakoulu 2017.)

3 PUU RAKENNUSMATERIAALINA

3.1 Puun asema rakentamisessa

Suomen metsissä kasvaa vuosittain lähes 110 miljoonaa kuutiota runkopuuta, josta viime vuosina on hyödynnetty vain noin 60–65 %. Puun käyttöä mm. rakennusmateriaalina voitaisiin lisätä huomattavasti (noin 20 miljoonaa kuutiota). Puurakentamisen osalta Suomessa on suuria kasvumahdollisuuksia. Tulevaisuudessa puuta voidaan käyttää entistä enemmän etenkin julkisessa rakentamisessa, hallirakennuksissa, silloissa ja kerrostalorakentamisessa. (Karjalainen 2016.)

Ympäristön kuormituksen vähentämiseksi kulutuksen painopistettä on siirrettävä uusiutuviin ja kierrätettäviin raaka-aineisiin. Puusta valmistetuille tuotteille, jotka sitovat hiiltä, syntyy tästä syystä merkittäviä uusia markkinoita lähitulevaisuudessa. Rakentaminen kuluttaa noin puolet luonnonvaroista ja tuottaa noin 40 prosenttia jätteistä. Puuta käyttämällä, etenkin rakennustuotteissa, voidaan vähentää päästöjä huomattavasti. Puu tuottaa enemmän energiaa kuin kuluttaa, joten muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna puu on energiatehokkain. (Puurakentaminen 2010.)

Puu on ollut perinteisesti yksi käytetyimpiä rakennusmateriaaleja Suomessa. Puun valtakausi rakentamisessa kesti aina 1950-luvulle sakka, jolloin kerrostalorakentamisen yleistyessä huomattavasti mm. betoni löysi paikkansa Suomen rakentamisteollisuudessa. Puurakentamisen osuus laski vuoden 1957 43 prosentista kymmenessä vuodessa vain 26 prosenttiin. Puun käyttö rakentamisessa alkoi tuosta hiljalleen nousta, kunnes pientalojen yleistyminen verrattaessa kerrostalorakentamiseen nosti puurakentamisen osuuden 1980-luvulla nopeasti. Nykyisin puurakennuksia on noin puolet koko Suomen talonrakennustuotannosta. (Siikanen 2016, 17–18.)

Puuteollisuuden nousu ja valtiovallan myönteinen suhde puurakentamiseen 1990-luvulla ovat luoneet puurakentamiselle aivan uudet tulevaisuuden näkymät. Ennen vuosituhaten vaihdetta ja sen jälkeen puurakentamisessa on tapahtunut merkittäviä muutoksia ja kehitystä. Palomääräysten muutokset ovat mahdollistaneet useampikerroksisten puisten asuinrakennusten rakentamisen ja tästä

syystä puuta käytetäänkin yhä enemmän mm. kerrostalojen ja koulujen sekä muiden julkisten rakennusten rakentamisessa. (Siikanen 2016, 18.)

Rakentamisessa puuta käytetään käytännössä jokaisella eri rakentamisen osalla alueella. Yleisimpiä puurakenteita rakennuksissa on erilaiset pilarit ja palkit, runkorakenteet sekä yläpohja. Nykyään alapohjissa käytetään enemmän betonia, mutta myös puusta saadaan tehtyä järkeviä ja kestäviä alapohjarakenteita. Puurakenteen hyötyjä on sen muokattavuus, keveys ja yllättävän hyvä palonkestävyys. Puurakenteet ovat myös lujia ja kestäviä ja kestävät vertailun esimerkiksi betonielementteihin, vaikka puuta rakenteissa usein vieroksutaankin.

3.2 Puun fysikaalinen toiminta

Rakennusten tarkoituksena on yleisesti suojata ihmisiä ja tavaroita ympäristöstä aiheutuvilta uhkatekijöiltä. Tällaisia uhkatekijöitä ovat esimerkiksi sade, tuuli ja auringon aiheuttamat säteily ja lämpö. Rakennukset on suunniteltava ja rakennettava niin, että kyseiset uhkatekijät eivät vaurioita rakenteita ja ihmisillä on turvallista asua erilaisissa rakennuksissa. (Siikanen 2016, 137.)

Rakennuksen fysikaalisia toimintoja ovat lämpö, kosteus, painesuhteet, ääneristys ja palonkestävyys. Tässä työssä keskityttiin koeseinien lämpö- ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin, joten ääni- ja paloteknisiä ominaisuuksia tässä työssä ei käydä läpi. Painesuhteet vaikuttavat koeseinien lämpö- ja kosteusteknisiin toimintoihin, joten siitä on esitetty teoriaa myös.

3.2.1 Rakennuksen painesuhteet

Rakennuksessa esiintyvät ilmanpaineet ja ilmanpaine-erot vaikuttavat lämmön ja kosteuden ohella rakennuksen ja rakenteen lämpö- ja kosteusteknisiin toimintoihin. Pakotettu konvektio eli LVI-laitteiden, tuulen ja savupiippuvaikutuksen takia tapahtuva ilmanpaine-ero syntyy seuraavasti: kun ilma lämpenee, sen tiheys pienenee ja lämmennyt, kevyt ilma pyrkii nousemaan ylöspäin. Tällöin huoneen yläosaan syntyy ylipainetta ja alas taas alipainetta. (Siikanen 2016, 138.)

Savupiippuvaikutuksesta syntyvät paine-erot ovat hyvin pieniä, mutta pysyviä. Tästä syystä ne vaikuttavat rakenteiden kosteus- ja lämpötekniisiin ominaisuuksiin. Savupiippuvaikutus riippuu huoneen tai hormin korkeudesta ja lämpötilaeroista. (Siikanen 2016, 139.)

Tuulen aiheuttamat ilmanpaine-erot riippuvat tuulen suunnasta, voimakkuudesta sekä rakennuksen korkeudesta ja muodosta. Lisäksi muut rakennukset ja ympäröivän maaston muodot vaikuttavat tuulen aiheuttamaan paine-eroon. Tuulen aiheuttamat yli- ja alipaineet voivat olla hetkellisesti suuriakin. Jos tuuli vaikuttaa pitkäaikaisesti, voi se kasvattaa seinien läpi kulkevan lämmön ja kosteuden siirtymistä. Jos seinät ovat tiiviitä, ei tuuli vaikuta rakennukseen niin paljon kuin vähemmän tiiviissä. (Siikanen 2016, 139–140.)

LVI-laitteiden käyttö on lisääntynyt ja monipuolistunut viime vuosina paljon. Tämä aiheuttaa enemmän vaatimuksia rakenteiden tiiviydelle. Koneellista ilmanvaihtoa käytettäessä on laitteet säädettävä aina niin, että rakennuksessa vallitsee alipaine. Huoneeseen aikaansaatu alipaine vetää ulkoapäin kylmää ilmaa rakenteiden sisään ja ilmapirtauksen lämmetessä se alentaa rakenteessa esiintyvää suhteellista kosteutta. Tämän tapahtumaketjun ansiosta rakenteet pysyvät kuivina ja turvallisina kosteusteknisesti. (Siikanen 2016, 140.)

Luonnollinen konvektio on ilman tiheyseroista johtuvia ilmanpaine-eroja ja ilman kiertoliikettä. Se muodostuu esimerkiksi huokoisissa eristeissä sekä ikkunoiden ja ovien raoista. Huokoisen lämmöneristeen sisällä ilma lämpenee sisäpintaa lähempänä ja pyrkii näin ollen nousemaan ylöspäin. Ulkopinnan puolella ilma kylmenee ja pyrkii siirtymään alaspäin. Näin syntyy ilmakierto, joka täytyy ottaa huomioon rakenteita suunniteltaessa. (Siikanen 2016, 140-141.)

Sisä- ja ulkopuolen väliset ilmanpaine-erot rakennuksessa ovat voimakkuudeltaan (Pa/m^2) pieniä, mutta vesihöyryn osapaineista johtuvat osapaine-erot rakenteissa voivat olla jopa satoja Pa/m^2 . Kuitenkin ilmanpaine-eroista on suurempi haitta rakenteille, kuin vesihöyryn osapaineista johtuvista osapaine-eroista, eli diffuusiosta. Rakennuksen seinissä sijaitsevista pienistäkin rei'istä voi sisäpuolen ylipaineen vaikutuksesta siirtyä ilmaa sisäpuolelta ulospäin. Tästä syystä voi rakenteisiin tiivistyä kosteutta. Jos taas rakennuksen sisällä vallitsee alipaine, kuluu kylmempi ilma ulkoa sisälle päin ja lämmetessään kuivattaa rakennetta.

Kuten aiemmin tuli todettua, tulisi siis rakennukset suunnitella alipaineiseksi, jotta rakenteet toimivat kosteusteknisesti. Rakennuksissa ja rakenteissa vallitsevilla ilmanpainesuhteilla on kosteus- ja lämpöteknisesti vaikutusta lähinnä kylmällä ilmalla. (Siikanen 2016, 142.)

Rakennusvaipan ilmanpitävyys on tärkeää, jotta rakenteille ei aiheudu kosteusvaurioita. Suurin huomio täytyy kohdentaa läpivienteihin ja liitoksiin. Rakennusvaipan ilmanvuotoluku (q_{50}) saa olla maksimissaan $4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ (Siikanen 2016, 142.)

3.2.2 Lämpöteklinen toiminta

Lämpö siirtyy rakenteissa kolmella eri tavalla; säteilemällä, johtumalla ja konvektion, eli ilmapirtauksen avulla. (Siikanen 2016, 143.)

Rakennustekniikassa säteilylämpö esiintyy kahdella tavalla; lyhytaaltoisena ja pitkäaaltoisena kappaleiden säteilemänä lämpönä. Lyhytaaltainen säteilylämpö aiheutuu auringonsäteilystä. Säteilylämmön aallonpituudella on merkitystä rakennustekniikassa esimerkiksi ikkunoiden lämmönläpäisyä tutkittaessa (Siikanen 2016, 143). Säteilylämpö vaikuttaa myös seinien lämpötiloihin. Varsinkin ilman suunnalla on vaikutusta säteilylämmön nostattamiin seinien lämpötiloihin. Etelänpuoleisella seinällä säteilylämpö voi aiheuttaa kuumalla ilmalla ja kovassa auringonpaisteessa suuriakin eroja seinien lämpötiloissa verrattuna pohjoispuolen seinään.

Lämmön johtumista ilmenee kiinteissä aineissa ja nesteissä. Johtuminen tapahtuu, kun molekyylien liike-energia siirtyy toiseen molekyyliin. Lämpö pyrkii aina johtumisessa kulkeutumaan lämpimämmästä ilmasta kylmempää kohti. (Siikanen 2016, 143.)

Konvektioita on sekä pakotettua että luonnollista. Pakotetussa konvektiossa ilma liikkuu esimerkiksi tuulen tai koneellisen ilmanvaihdon voimasta. Luonnollinen konvektio tapahtuu lämpötilaeroista johtuvista tiheyseroista. Täysin luonnollista konvektiota tapahtuu harvoin. (Siikanen 2016, 143–144.)

Lämmönjohtavuus (λ) on materiaaliominaisuus, jonka avulla voidaan määritellä lämmönvastus (R , yksikkö mK/W). Lämmönjohtavuuden yksikkönä käytetään W/mK . Lämmönjohtavuus kertoo metrin paksuisen ja neliömetrin kokoisen materiaalikerroksen läpi kulkevan lämpötehon, kun lämpötilaero pintojen välillä on yksi aste. Lämmönvastus kuvaa hyvin rakenteen lämpökäyttäytymistä. Materiaalin lämmönvastus saadaan seuraavalla kaavalla

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1)$$

jossa

R on lämmönvastus (mK/W)

d on materiaalikerroksen paksuus (m)

λ on materiaalin lämmönjohtavuus (W/mK) (Lindberg 2003, 426.)

Lämmönläpäisykertoimella U (yksikkö $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) tarkoitetaan lämpövirran tiheyttä, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakenteen eri puolilla on yksikön suuruinen. Rakennusosan lämmönläpäisykerroimen voi laskea seuraavalla kaavalla

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2)$$

jossa

U on rakennusosan lämmönläpäisykerroin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)

R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

Rakennusosan kokonaislämmönvastus sisältää rakennusosan lämmönvastuksen ja pintavastukset. (Siikanen 2014, 50–51.)

3.2.3 Kosteustekninen toiminta

Ilmassa ja rakenteissa on aina normaaleissa olosuhteissa jonkin verran kosteutta. Kosteuden määrä on riippuvainen ympäröivän ilman lämpötilasta ja kosteudesta sekä materiaalin ominaisuuksista. Rakenteissa saattaa ilmetä rakentamisaikaista kosteutta, jota pitäisi kyetä mahdollisuuksien mukaan rajoittamaan. Kosteuden kulkeutumista kutsutaan kolmella termillä; absorptio, joka tarkoittaa

kosteuden kulkeutumista aineeseen, sorptio tarkoittaa kosteuden kulkeutumista aineessa ja desorptio kosteuden poistumista aineesta. Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa tulisi tarkastella vähintään vuoden ajan, jotta sääolosuhdemuutokset voidaan ottaa kosteusteknisessä toiminnassa huomioon. (Siikanen 2016, 158.)

Sateen vaikutus rakentamisessa tapahtuu ajallisesti kahdessa jaksossa, rakentamisen aikaan ja sen jälkeen. Rakentamisen aikaan sade voi kosteuttaa rakenteita ja siitä saattaa aiheutua kosteushaittaa, jos rakenteita ei suojata tarkoituksenmukaisesti. Rakentamisen jälkeen sade aiheuttaa räsytystä kattoon, vesikouruihin, julkisivuun, perustuksiin ja maahan tunkeutuessaan myös maanalaisiin rakenteisiin. (Björkholtz 1997, 40.)

Rakennustarvikkeet, jotka voivat vaurioitua sateen takia, suojataan rakentamisen aikaan varastoimalla sateensuojaan tai peittämällä. Sateen vaikutus voi vaurioittaa rakennustarvikkeita heti tai pitkänkin ajan kuluttua, esimerkiksi puu altistessaan liiaksi sateelle voi halkeilla kuivuessaan (Björkholtz 1997, 40). Rakennusosat voivat myös pitkään kosteina pysyessään altistua erilaisten mikrobien eli home- ja lahosienien, hiivojen ja bakteerien kasvuille. Kosteusvauriot voivat joutua monestakin eri syystä. Esimerkiksi suunnitteluvirheet ja -puutteet, rakennusvirheet, laadunhallinnan puute, puutteellinen huolto ja käyttövirheet voivat altistaa kosteusvaurioille (RT 05-10710, 1). Rakenteilla olevat rakennukset suojataan nykyään yhä useammin erilaisilla sääsuojilla, joilla vähennetään rakenteiden kosteusvaurioita. Säältä suojassa rakentaminen luo lisäkuluja rakentamisen aikaan, mutta yleensä se maksaa itsensä takaisin rakenteiden vähäisten kosteusvaurioiden ansiosta.

Kaikki rakenteet, jotka sijaitsevat vedenpinnan yläpuolella, ovat kosketuksissa ilman kanssa. Lisäksi suuressa osassa rakennusaineita on huokoisia, joissa on ilmaa. Ilman kosteus on otettava huomioon suunnitellessa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. (Björkholtz 1997, 43.)

Koste ilma on kahden kaasun, kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Ilmassa esiintyvää kosteutta voidaan ilmaista vesihöyrymääränä eli absoluuttisena kosteutena (g/m^3), vesihöyryn osapaineena (Pa) tai suhteellisena kosteutena (RH %). Kosteustarkastelussa keskeinen yhtälö on kaasujen tilan yhtälö:

$$p * V = \frac{m}{M} * R * T \quad (3)$$

missä

p on kaasun (eli vesihöyryn) paine (Pa)

V on kaasun tilavuus (m³)

m on kaasun massa (kg)

M on kaasun normaalipaino (kg/kmol)

R on yleinen kaasuvakio 8314,3 J/kmolK

T on lämpötila (K)

Kaavasta 3 saadaan kaasun tiheydeksi

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p * M}{R * T} \quad (4)$$

ja edelleen kuivan ilman tiheydeksi

$$\rho_i = \frac{p_i * M_i}{R * T} \quad (5)$$

sekä vesihöyryn tiheydeksi tai vesihöyrypitoisuudeksi

$$v = \frac{p_v * M_v}{R * T} \quad (6)$$

Kaavasta 6 voidaan johtaa yhteys vesihöyryn osapaineen (p_v) ja vesihöyrypitoisuuden (v) välille:

$$v = \frac{p_v * 18,02}{8314,3 * T} = \frac{p_v}{461,4 * T} \quad (7)$$

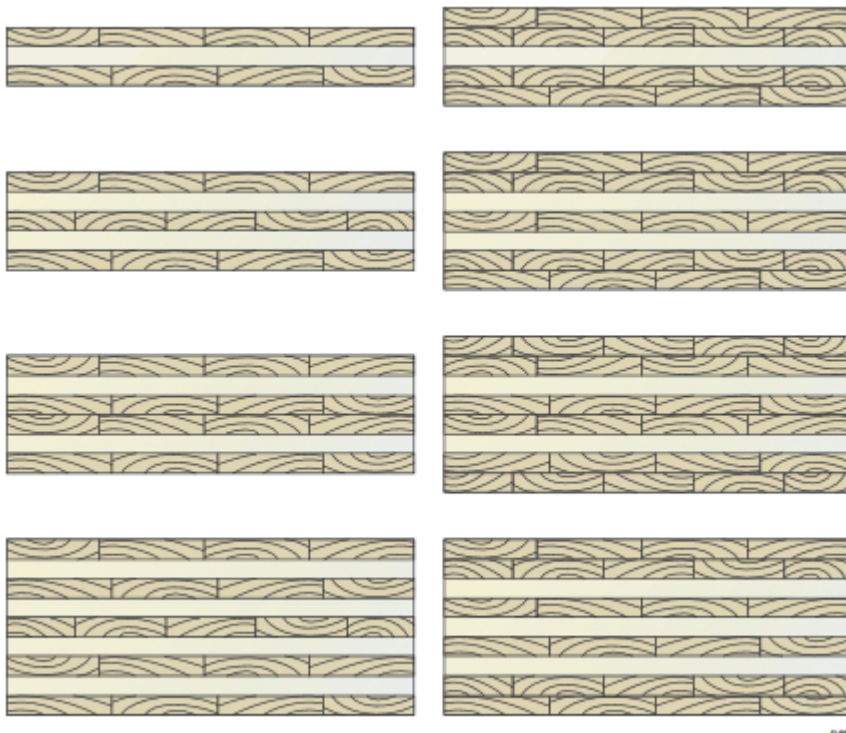
Tästä voidaan todeta, että vesihöyryn osapaine ja ilman vesihöyrysisältö ovat keskenään suoraan verrannolliset. (Björkholtz 1997, 43.)

3.3 CLT

CLT (Cross-laminated Timber) on ristiinliimattu massiivipuulevy, jota voidaan käyttää kantavana ja jäykistävänä rakenteena. Levystä valmistetaan seiniä, latti-
oita, välipohjia ja kattoja. CLT-levyssä voi olla useita kerroksia, joiden paksuudet vaihtelevat rakenteellisten vaatimuksien mukaan (kuvio 1). Yleisimmissä levyissä

kerroksia on kolme tai viisi (Puuinfo 2011). CLT-elementillä on monia hyviä ominaisuuksia:

- lujuus
- jäykkyys
- tiiveys
- hyvin paloa kestävä
- helppotyösteinen
- nopea pystyttää
- kevyt (vrt. tiili ja betoni)
- terveellinen sisäilma
- ympäristöystävällinen (Stora Enso 2013).



Kuvio 1. Esimerkkejä CLT-levyn poikkileikkauksista (Gagnon & Pirvu 2011, 5)

CLT kehitettiin alkujaan Itävallassa ja Saksassa ja on sittemmin saavuttanut suosiota ympäri maailmaa, etenkin Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. 1990-luvun puolivälissä Itävallassa tehtiin tutkimushanke, jossa kehitettiin nykyaikaista CLT-materiaalia. Alkujaan kehitys oli hidasta, mutta 2000-luvulla CLT:n käyttösuosio kasvoi. Syitä CLT:n suosion kasvuun olivat mm. sen ekologisuus, tehokkuus, parantunut markkinointi ja jakelu. (Gagnon & Pirvu 2011, 1.)

Vaikka puu on kevyt rakennusmateriaali, niin sillä on siitä huolimatta hyvä lämpökapasiteetti, eli terminen massa. Terminen massa tarkoittaa materiaalin kykyä

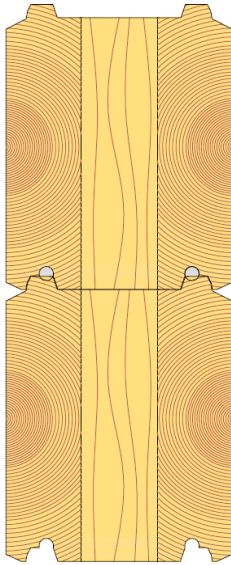
luovuttaa ja sitoa lämpöä itseensä. CLT-rakenteinen runko voi toimia ylimääräisen lämpöenergian puskurina ja näin pienentää huoneilman liiallista lämmön nousua sekä toisin päin, eli sisäilman viilentyessä CLT-rakenne tasoittaa asumisen lämpöolosuhteita. Runkomateriaali, jolla on korkea terminen massa, parantaa rakennuksen energiataloutta sekä asumismukavuutta (Autioniemi, Pirttinen & Vatanen 2016, 12). CLT-levyn lämpötekniset ominaisuudet ovat lähestulkoon samanlaiset kuin puulla. Itävaltalaisissa standardeissa Stora Enson CLT-levyn lämmönjohtavuuden arvoksi on määritetty 0,11-0,13 W/mK (Stora Enso 2012). Opin näytetyössä tutkitun seinän U-arvolaskelman (liite 1) laadin Tampereen teknillisessä yliopistossa tarkastetun Excel-pohjan avulla.

CLT-rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta tärkein asia on CLT:n toimiminen höyrynsulkuna. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan lämmöneristykseen lämpimällä puolella olevien ainekerrosten yhteenlaskettu vesihöyrynvastus tulee olla vähintään viisinkertainen tuulensuojan vesihöyrynvastukseen verrattuna. Esimerkiksi 100 mm:n paksuisella CLT-elementillä vesihöyrynvastus on noin 25-kertainen tyypilliseen tuulensuojaan verrattuna. Massiivisen rakenteensa ansiosta CLT-rakennuksissa höyrynsulku onnistutaan toteuttamaan yhtenäisenä varmemmin kuin monissa muissa rakennevaihtoehdoissa. (Autioniemi, Pirttinen & Vatanen 2016, 16.)

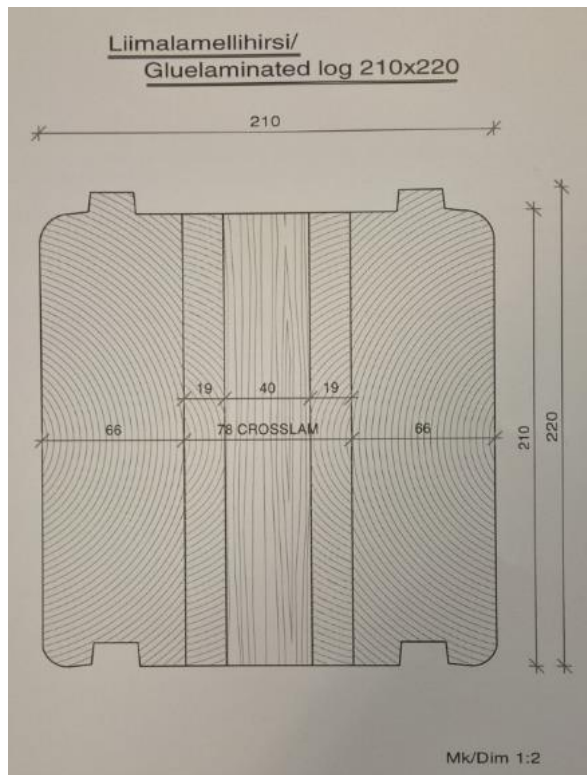
3.4 Hirsi

Hirrestä valmistetut rakennukset ovat tarjonneet suojaa ihmisille jo vuosisatojen ajan. Hirsirakentaminen on kehittynyt aikojen saatossa huippuunsa ja se on nykyäänkin erittäin suosittu rakentamistapa. Hirsirakentamisen etuja on erityisesti Suomessa sen kotimaisuus, tutkitusti terveellinen sisäilma, pitkäikäisyys sekä kestävä kehitys. Hirsirakennusten tuotanto on energiaomavaraista, sillä hirsirakennusten tuotantoketjussa syntyy sivutuotteena enemmän energiajätettä kuin sitä kuluu itse tuotteen valmistukseen. Hirrestä rakennetaan omakotitaloja, lomiasuntoja, piharakennuksia ja julkisia rakennuksia. Suomi on teollisesti tuotettujen hirsitalojen suurin viejämaa maailmassa. (Hirsirakentaminen 2017.)

Painumaton hirsi on yksi uusimpia hirsirakentamisen innovaatioita. Painumattomuus saadaan aikaan aikaan käytännössä pystypuisella keskilamellilla (kuvio 2). Painumattoman hirren etuna on mm. yhdisteltävyys muiden rakennusaineiden, kuten kiven, teräksen ja lasin kanssa eikä painumaa tarvitse huomioida. CLT-hirrestä valmistettu painumaton hirsi on oletettavasti aiempia painumattomia hirsirakenteita lujempi ja painumattomampi (kuvio 3).



Kuvio 2. Painumaton lamellihirsi (Puuinfo 2017)



Kuvio 3. CLT-massiivipuulementillä vahvistettu hirsi

4 AIKAISEMMAT RAKENNUSFYSIKAALISET TUTKIMUKSET

Koeseinän testausta valmistellessani tutkin aiempia samantyyppisiä rakennusfysikaalisia tutkimuksia, joita oli tehty käytännössä samalla tavalla kuin tämäkin tutkimus joitain poikkeuksia lukuun ottamatta. Aiempia tällaisia tutkimuksia ovat esimerkiksi Tampereen teknillisessä korkeakoulussa Pasi Käkelän ja Juha Vinhan toimesta tuotettu tutkimus *Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta* sekä Antti Sirkan opinnäytetyö *Rakennetestauksen kehittäminen Arctic Powerilla*. Edellä mainitut työt auttoivat tämän opinnäytetyön valmistelemissä ja varsinkin Käkelän ja Vinhan tutkimus auttoi tutkimusolosuhteiden valinnassa.

Käkelän & Vinhan sekä Sirkan tutkimuksissa eroavaisuuksia tähän työhön oli mm. olosuhdekammiot ja niissä käytettävät säätömahdollisuudet. Centrian tiloissa, jossa tämän tutkimuksen suoritin, oli ainoastaan yksi kammio, johon seinä sijoitettiin. Kammion kylmälle puolelle oli mahdollista simuloida lämpötila ja kosteus, mutta seinän ns. sisäpuolelle lämpötilan ja kosteuden simulointiin tarvittiin erilaisia lämpö- ja kosteudenlähteitä, koska niiden säätömahdollisuutta sisäpuolella ei ollut. Lisäksi erona aiempiin tutkimuksiin oli se, että niissä oli tavoitteena kehittää TTK:n ja Arctic Powerin laboratoriotutkimusta ja tutkimusmenetelmiä, kun taas tässä työssä keskityttiin ainoastaan seinän tutkimukseen eikä otettu kantaa siihen, miten Centrian olosuhdekammio -testausta voisi kehittää.

Lisäksi opinnäytetyön taustatyötä tehdessäni perehdyin Kemiin rakennetun CLT-koetalon raporttiin *CLT-koetalon rakennusfysikaaliset tutkimukset*. Kemin koetalon rakennusfysikaalisen tutkimuksen raporteista sai hyvää ja kattavaa tietoa tätä opinnäytetyötä varten.

5 TESTISUUNNITELMA

5.1 Tausta

Haapavedellä toimiva hirsitalovalmistaja Timber-hirsi Oy kehitteli uutta painumatonta yhdistelmähirsirakennetta, jota käytettäisiin yrityksen hirsivalikoimassa tulevaisuudessa. Rakenteen oletettuja etuja olisivat painumattomuus ja kantavuus. Painumaton hirsirakenne mahdollistaisi erilaiset rakennustavat, esimerkiksi seinärakenteen yhdistämisen betonirakenteiden kanssa sekä nopeammat kattorakenteet.

Tuotteen kehittämiseen Timber-hirsi oli hakenut rahoitusta ELY-keskuksesta ja sai kehittämiseen myönteisen tukipäätöksen. Timber-hirsi on tehnyt yhteistyötä tämän tuotteen tuotekehityksen osalta Kuhmo Cross Lamm:n, Toliwoodin ja Rakennusliike Pekka Hännisen kanssa. Yrityksen suunnitteleman koetalon rakentaminen Haapavedelle alkoi toukokuussa 2017.

Yrityksen tavoitteena oli saada tutkittua ja testattua tietoa painumattoman yhdistelmähirsirakenteen käyttäytymisestä todellisessa käyttökohteessa. Oleellista oli tutkia, tapahtuuko rakenteissa muutoksia, joita ei ole osattu huomioida. Rakenteiden painumaa todennetaan rakennuksen sisäosiin tehtävällä laser-mittauksella. Tarkkailtavia fysikaalisia suureita olivat kosteus ja lämpötila rakenteessa ja sisä- sekä ulkoilmassa. Tieto kerätään kahdelta eri ilmansuuntaan olevalta seinältä. Painumisen mittausta koeseinän testauksessa ei kyetty todentamaan, joten sen mittaus tapahtuu itse koetalossa.

Centria-ammattikorkeakoululla Ylivieskassa löytyi koeseinän tutkimukseen soveltuvat tilat. Centrian testilaboratoriossa koeseinät pystyttiin rakentamaan koekammioon, jossa olosuhteita päästiin muuttamaan niin, että seinän toiselle puolelle asetettiin pakkaslämpötila ja toiselle normaali sisälämpötila, noin +20°C. Myös kosteuspitoisuuksia oli mahdollista säädellä.

Opinnäytetyössä tarkoituksena oli suunnitella painumattomasta hirsiseinästä koeseinä, jonka lämpö- ja kosteusteknisiä ominaisuuksia tutkittiin OmniSense-mittauslaitteilla. Lisäksi koekammioon rakennettiin vertailun vuoksi toinen seinä normaalista hirrestä. Hirsiseinien testauksella saatiin selville, mille syvyydelle

mittausanturit sijoitetaan myöhemmin rakennettavassa koetalossa. Lisäksi testillä saatiin suuntaa-antavaa dataa siitä, miten normaali ja CLT-hirsiseinä eroavat toisistaan lämpö- ja kosteusteknisesti.

Koeseinien tutkimuksessa tärkeimpiä mitattuja suureita olivat:

- lämpötila
- suhteellinen kosteus
- puun kosteuspitoisuus.

Ylläolevia suureita tutkittiin kuvitelluista huone- ja ulkoilmasta sekä rakenteesta eri syvyyksiltä.

5.2 Koeseinien rakentaminen

Koeseinien rakentamisen suunnittelu aloitettiin selvittämällä Centrian tiloissa sijaitsevan laboratorion olosuhdekammion toiminta ja mitat. Olosuhdekammio on pituudeltaan noin 3,5 metriä ja leveydeltään noin 2,3 metriä pitkä. Sen korkeus on noin 2,3 metriä ja tilavuus noin 18,5 kuutiometriä. Koeseinä rakennettiin siten, että sen toiselle puolelle jäi ulkoilmaa simuloiva laitteisto ja toiselle puolelle jäi tyhjä, laboratorion sisälämpötilaa vastaava tila. CLT- ja normaalit hirret tilattiin Timber-hirreltä ja tarkoituksena oli rakentaa seinät paikan päällä itse. Kun hirret, tarvittavat asennusmateriaalit ja -ohjeet saapuivat, aloitettiin koeseinien rakentaminen.

Koeseinien tiivistys olosuhdekammiossa oli erittäin tärkeää, jotta mahdollisilta ilma- ja lämpövuodoilta välttyttiin ja etteivät ne aiheuttaisi epätarkkoja mittauksia. Koeseinien alle asennettiin 100 mm paksu FinnFoam-eristelevy (kuvio 4), jonka alle sekä seinien ja levyn väliin pursutettiin uretaanivaahtoa tiiviyn varmistamiseksi. Kun seinät saatiin pystytettyä asennusohjeiden mukaisesti, asennettiin seinien väliin sekä seinien ja kammion seinämien väliin FinnFoam-eristelevyt. Kaikki saumat eristettiin uretaanivaahdolla sekä höyrynsulkuteipillä (kuvio 5). Seinien, eristeiden ja tiivistyksien asennuksen jälkeen seiniin ruuvattiin mittauslaitteet (kuvio 6), jotka lähettivät mittausdataa reaaliajassa OmniSensen Web-pohjaiseen palveluun.



Kuvio 4. Koeseinien alle asennettiin 100 mm paksu FinnFoam-eristelevy



Kuvio 5. Kaikki saumat eristettiin uretaanivaahdolla ja tiiviyn varmistamiseksi saumat teipattiin höyrynsulkuteipillä



Kuvio 6. Koeseiniin asennettiin OmniSensen S-16 -sensorit

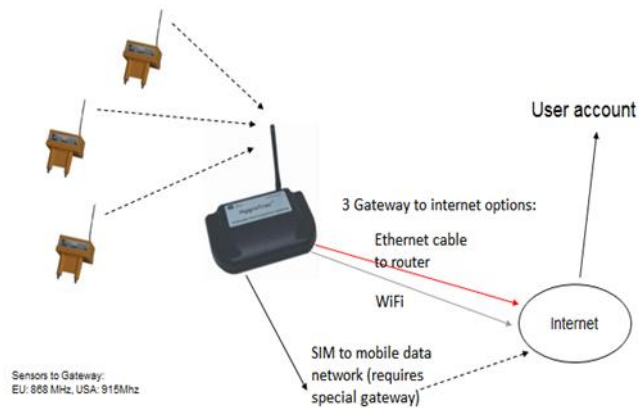
5.3 Mittausjärjestelmä

Koeseinien kosteus- ja lämpökäyttämisen tutkimuksessa mittalaitteina käytettiin OmniSensen sensoreita ja vastaanottimia. Mittausjärjestelmään koostui yhdestä tukiasemasta (kuvio 7) ja siihen liitetyistä lämpö- ja kosteussensoreista. Järjestelmä oli erittäin helppokäyttöinen. Se ei vaatinut muuta kuin langattomien sensoreiden asennuksen seiniin sekä internet-yhteyden luomisen vastaanottiin. Yhteyden luominen oli helppoa SIM-kortilla, jonka sai asennettua G-3 -vastaanottiin.



Kuvio 7. OmniSense G-3 -tukiasema (OmniSense 2017a)

Järjestelmä rakentuu tukiaseman, eli vastaanottimen ympärille (kuvio 8), joka vastaanottaa sensoreiden lähettämät mittaustulokset ja lähettää ne edelleen tietokantaan. Yhteyskatkoksia varten laitteessa on myös paikallista muistia tulosten tallentamiseen. Tukiasema tarvitsee virtalähteen, mutta sensorit toimivat litiumparistojen avulla.



Kuvio 8. Tukiasema välittää mittaustulokset tietokantaan (AECB 2017)

S-16 -sensoreilla on mahdollista mitata lämpötilaa, ilman suhteellista kosteutta ja puun sisäistä kosteutta samanaikaisesti. Puun kosteudenmittaus on toteutettu vastusmittauksella sensorin porautuvien kiinnitysruuvin kautta. Sensori on mahdollista upottaa rakenteisiin tai sillä voi tehdä lyhytaikaisempia mittauksia eri koh-teissa. Sensorissa käytetyn litium-pariston itsepurkautuvuus on erittäin pientä, jolloin pariston kesto riippuu lähinnä mittaustapahtumien määrästä ja ympäröi-västä lämpötilasta. Harvalla mittaustaajuudella sensorin toiminta-ajan voi olettaa olevan vuosia. Paristo on tarvittaessa myös vaihdettavissa.



Kuvio 9. Langaton OmniSense S-16 -sensori kiinnitettynä puuhun

OmniSense S-16 -sensorin ominaisuudet:

- lämpötila ($\pm 0,3$ °C), suhteellinen kosteus ($\pm 2,0$ %), puun kosteus (8-40 %)
- puun kosteuden vastusmittaus kiinnitysruuvin kautta
- mittausten tallennus sensorin muistiin
- vaihdettava litium-paristo
- sijoitettavuus rakenteen sisään
- lähetysetäisyys 46 metriä.

Erilliseen S-2 -lähetinyksikköön (kuvio 10) on yhdistettävissä kaksi ulkoista lämpö- ja kosteusanturia ja johtosarja vastusmittauselektrodeille. S-2 -yksiköllä voi suorittaa suhteellisen kosteuden mittaukset esimerkiksi porareiästä tai muusta ahtaasta tilasta. S-2 -sensori mahdollistaa myös langattoman lähetinyksikön sijoittamisen rakenteen ulkopuolelle. OmniSense S-2 -lähetinyksikön lämpötila- ja suhteellisen kosteuden mittatarkkuudet ovat samat kuin S-16 -sensorilla.

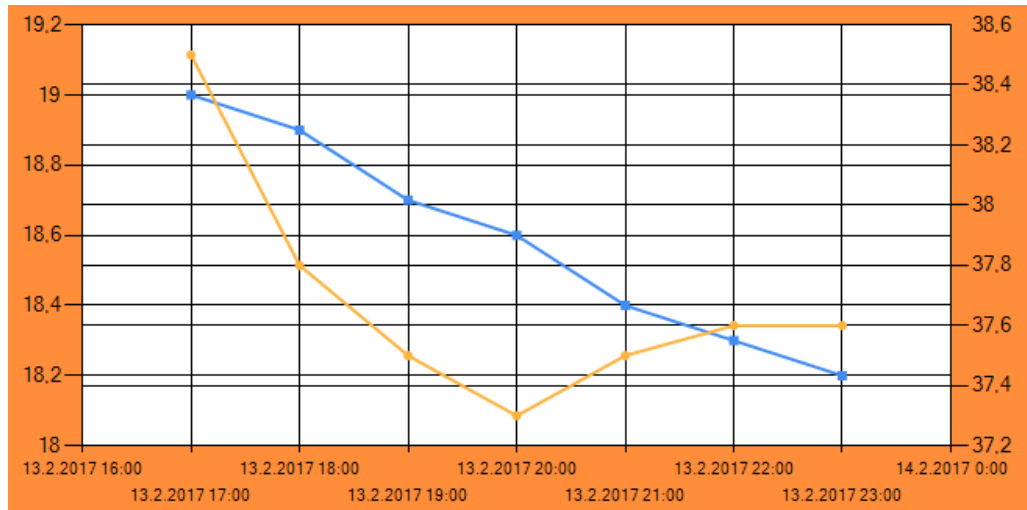


Kuvio 10. OmniSense S-2 -lähetinyksikkö tarvikkeineen (OmniSense 2017b)

5.4 Mittausdatan keruumenetelmä

Mittaustulosten tallentamiseen ja esittämiseen valmistaja tarjoaa oman Web-pohjaisen palvelun (kuvio 11). Mittaustietoja on mahdollista seurata reaaliajassa. Pal-

veluun voi asettaa esimerkiksi hälytysrajoja ja se tarjoaa yksinkertaisen visualisoinnin mittaustuloksille. Palvelun käyttö on sidottu kuukausimaksuun, josta muodostuu käytännössä koko mittausjärjestelmän käyttömaksu.

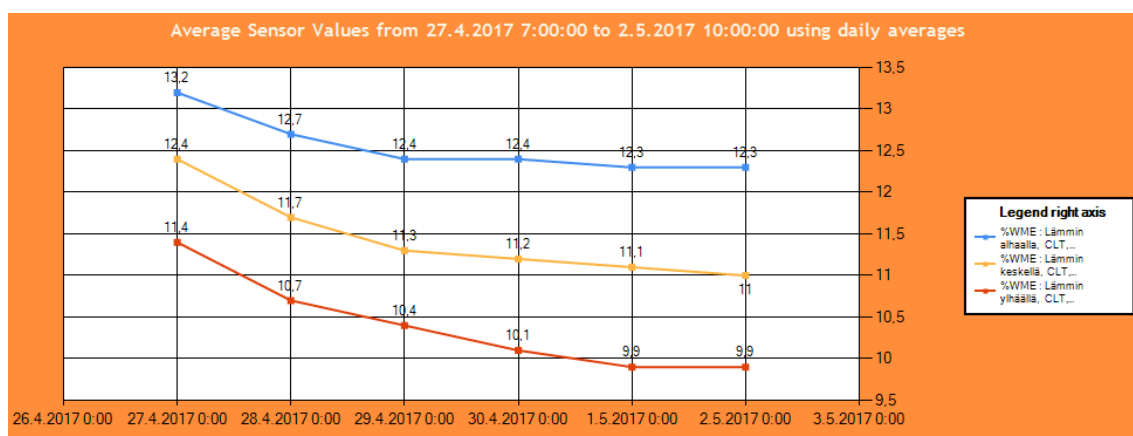


Kuvio 11. Sensorin mittaama keskiarvolämpötila ja -kosteus tunnin välein

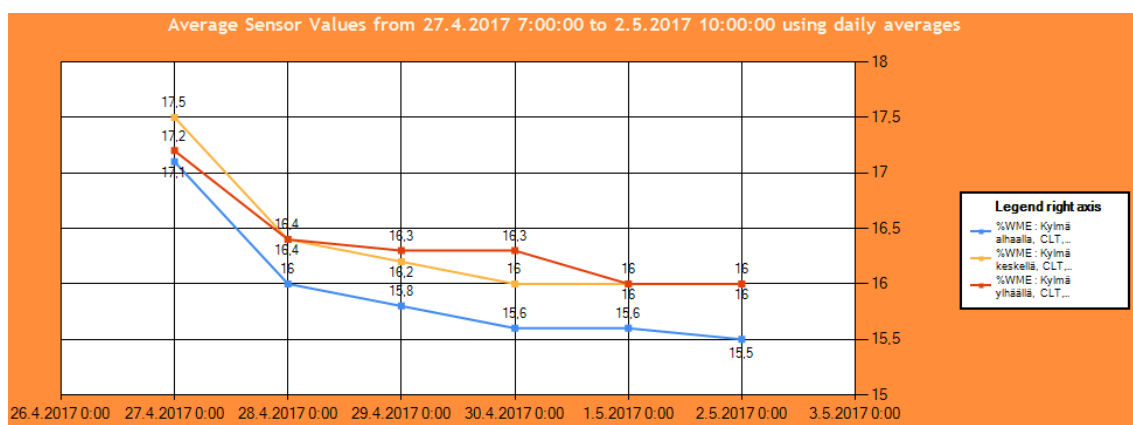
6 TULOKSET

6.1 Koeseinien kosteusteknisen mittauksen tulokset

Koeseinien tutkimuksesta saatiin suuntaa-antavaa tietoa siitä, miten testatut hirsirakenteet toimivat kosteusteknisesti. Lyhyeksi jääneen testiajan aikana CLT-hirsiseinän lämpimällä puolella puun kosteuspitoisuus putosi lähellä pintaa (n. 20 mm hirren pinnasta) alle 10 % kosteuslisästä huolimatta (kuvio 12). Muutoin lämpimällä puolella kosteusprosentti jäi testin päätteeksi 11,0 % ja 12,3 %. Kylmällä puolella puun kosteuspitoisuus laski myös, jääden testin lopussa lukemiin 15,5 – 16 % (kuvio 13).



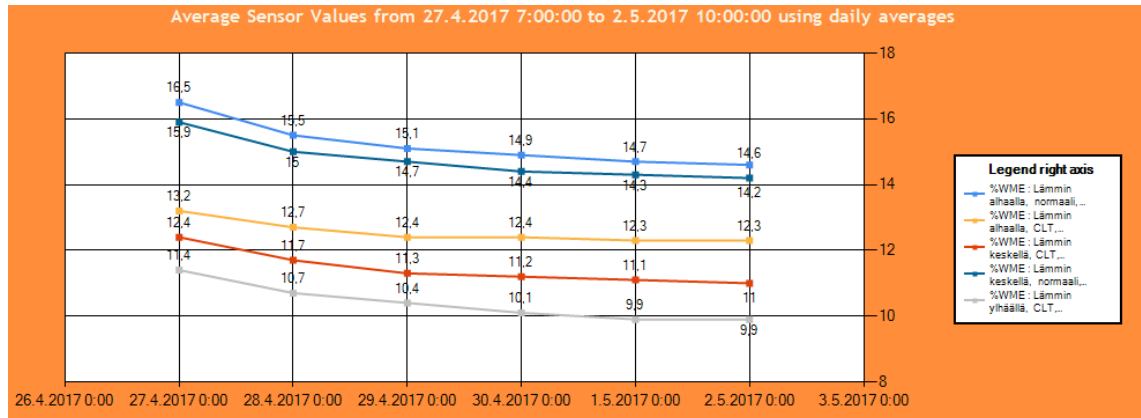
Kuvio 12. CLT-hirsirakenteen kosteuspitoisuuden keskiarvot päivittäin lämpimällä puolella



Kuvio 13. CLT-hirsirakenteen kosteuspitoisuuden keskiarvot päivittäin kylmällä puolella

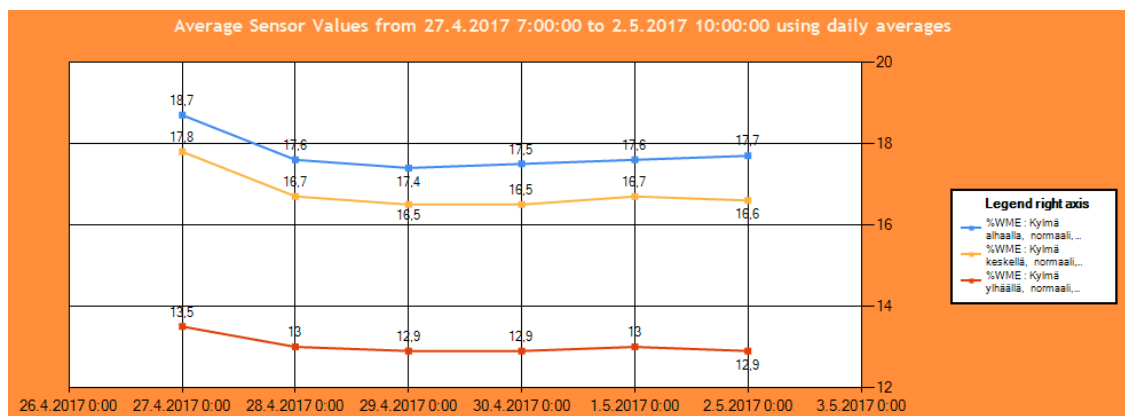
CLT-hirsirakennetta ja normaalia hirsirakennetta vertailtaessa voidaan todeta, että CLT-hirsiseinä pysyi ainakin alkuun kuivempänä kuin normaali hirsirakenne

ja lisäksi kuivui lämpimällä puolella parhaimmillaan aiemmin mainittuun alle 10 prosenttiin, kun taas normaalin hirsiseinän kahdesta mittapistestä kuivemmassa oli kosteusprosentti 14,2 % testin päätyttyä. Kuvioista 14 nähdään, kuinka CLT-hirsiseinässä (keltainen, punainen ja harmaa viiva) kosteuspitoisuus pysyi koko testin jokaisessa mittauspisteessä alempana kuin normaalin hirsiseinän mittauspisteet (sininen ja tummansininen viiva).



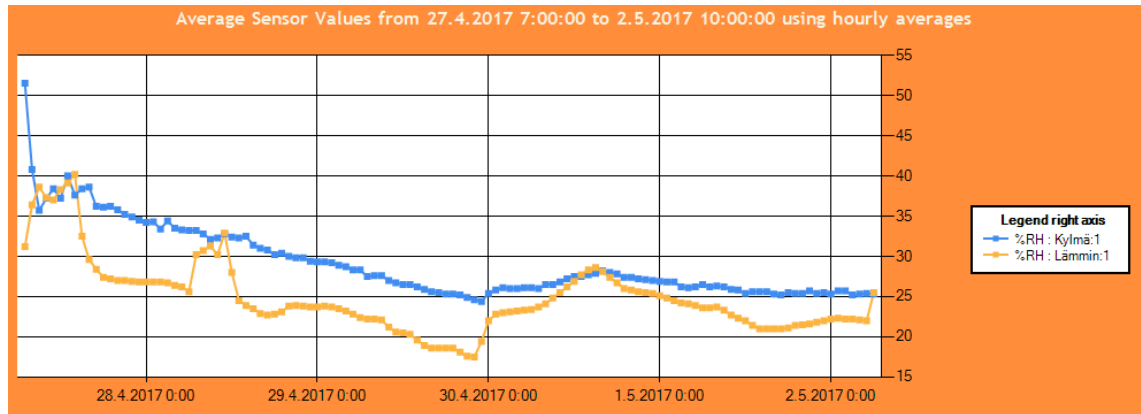
Kuvio 14. Lämpimän puolen antureiden mitaamat kosteuspitoisuuksien keskiarvot päivittäin

Kylmällä puolella normaalissa hirsiseinässä kosteuspitoisuus oli, kuten lämpimälläkin puolella, CLT-hirsiseinän arvoja hiukan isommat – yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Normaalin hirsiseinän yläpäässä mitta-anturi antoi selvästi pienempiä kosteuspitoisuuden arvoja kuin muissa pisteissä kummassakin seinässä (kuvio 15). Varmaa syytä siihen ei ole, mutta se voi johtua ainakin osittain kylmän puolen tuuleuksesta. Olosuhdekammion koneesta puhallettava kylmä ilma tulee kohdasta, jossa matalampia arvoja antanut anturi sijaitsee. Kylmää ilmaa puhalletaan olosuhdekammioon 6 m/s vauhdilla.



Kuvio 15. Kosteuspitoisuuksien keskiarvot päivittäin normaalissa hirsiseinässä

Lämpimän puolen, eli kuvitellun sisäilman suhteellinen kosteus (RH%) pysyi muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta koko testin ajan pienempänä kuin kylmän, eli kuvitellun ulkoilman suhteellinen kosteus (kuvio 16). Pyrkimys oli lisäkosteutuksella (kuvio 17) pitää sisäilman kosteutta huomattavasti korkeampana kuin ulkoilman, jotta diffuusion vaikutuksesta seinärakenteisiin olisi saatu enemmän räsitusta.



Kuvio 16. Sisä- ja ulkoilman suhteellisen kosteuden keskiarvo tunnin välein

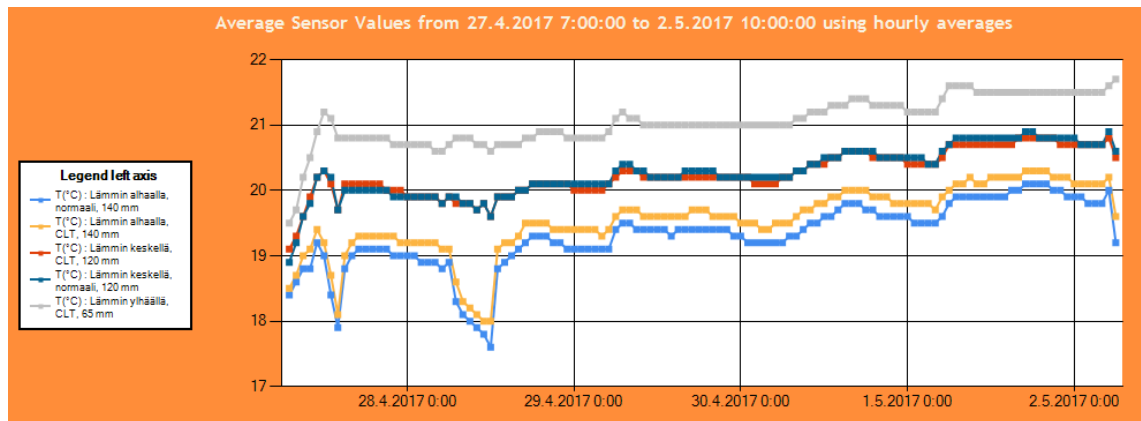


Kuvio 17. Sisäpuolen suhteellista kosteutta pyrittiin nostamaan lisäämällä kam-mioon vedellä täytettyjä astioita

6.2 Koeseinien lämpöteknisen mittauksen tulokset

Koeseinien lämpimämmällä puolella olleet anturit antoivat lähestulkoon samat lukemat niin CLT- kuin normaalissakin hirsiseinärakenteessa. Lämpötilat nousivat hieman testin edetessä muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Kuviosta 18 nähdään, kuinka keskiosassa olleet anturit (tummansininen ja punainen viiva) näyttävät käytännössä samaa lukemaa kummassakin seinässä. Samoin kävi alaosassa, jossa lämpötilat pysyivät lähes samoina kummassakin koeseinässä (keltainen ja vaaleansininen viiva).

Kylmällä puolella minkäänlaisia poikkeuksia ei tapahtunut. Jokaisessa mitauspisteessä päivittäiset keskiarvot pyörivät -10 ja -11 °C välillä.



Kuvio 18. Keskiarvot lämpötilasta rakenteissa lämpimällä puolella tunnin välein

6.3 Tulosten analysointi

Mittauksista saadut tulokset eivät aiheuttaneet suurempaa ihmettelyä. Yhtä poikkeusta vaille kaikkien mittapisteiden kohdalla tulokset noudattivat käytännössä samaa kaavaa: kun lyhimmillä ruuvilla kiinnitetty anturi antaa pienimmän arvon, niin pisimmällä ruuvilla kiinnitetty anturi antaa suurimman arvon. Ainoa suurempi poikkeama mittauksissa oli aiemmin mainittu normaalin hirsiseinärakenteen kosteuspitoisuus kylmän puolen yläosassa. Poikkeama johtui todennäköisesti kylmän ilman puhallussuunnasta.

CLT-hirsiseinän kosteuspitoisuus laski tasaisesti viiden vuorokauden testin aikana. Jos testi olisi jatkunut kauemmin, olisi myös syvemmillä hirren sisällä to-

dennäköisesti päästy vieläkin turvallisempiin, alle 10 % kosteuspitoisuuksiin. Testistä saadut arvot ovat kosteusteknisesti turvallisia. Jotta mahdollisilta halkeamilta vältyttäisiin, tulisi hirsien olla tarpeeksi kuivia ennen rakentamista. Puu kuivuu tasapainokosteuteen yleensä parissa viikossa, joten siinäkin mielessä testin tulokset eivät olleet täysin luotettavia lyhyen testausajan takia.

Koeseinien kosteudesta voitiin todeta myös se, että hirsirakenteiden lähtökosteus oli hieman toisistaan poikkeava. Tämä poikkeama johtuu todennäköisesti varastoinnista, joka vaikuttaa puun kosteuteen lähtötilanteessa. Jotta kosteuspitoisuuden mittauksesta saataisiin tarkempia arvoja, tulisi hirret kuivattaa samaan lähtökosteuteen ja pitää testiä yllä kauemmin. Tällöin CLT- ja normaalin hirsirakenteen kosteuden kestävyydestä saataisiin kattavampaa tietoa.

Saatuihin tuloksiin täytyi suhtautua varauksella. Testiaikaa pidentämällä tuloksista voitaisiin saada vartenotettavia ja luotettavia. Myös sisäilman suhteellisen kosteuden kanssa oli ongelmia. Sisäilman suhteellinen kosteus olisi ollut hyvä saada tasoittumaan johonkin pisteeseen. Tämä olisi ollut mahdollista testiajan pidentämisen lisäksi paremmalla varautumisella simulointia mahdollistaneisiin laitteisiin.

7 POHDINTA

Opinnäytetyö oli yllättävän pitkäkestoinen projekti siihen nähden, miten lyhyt aika seinän rakentamiseen ja testaukseen meni. Opinnäytetyö sai alkunsa vuoden 2017 alussa, jolloin töiden puolesta pääsin tämän tutkimuksen parissa työskentelemään. Erinäisten materiaalien toimitusongelmien takia testin aloitusajankohta venyi lopulta huhtikuun loppuun. Tästä syystä koeseinien olosuhdetesti jouduttiin suorittamaan vain viidessä vuorokaudessa, vaikka tällaisessa testissä olosuhteita pitäisi pystyä pitämään mielellään useamman kuukauden, jotta vartenotettavia tuloksia voitaisiin saada.

Pienistä vaikeuksista huolimatta opinnäytetyöstä jäi positiivinen tunne. Koeseinien tutkimus toimi kuitenkin vain esitutkimuksena. Vaikka testi kestitkin vain viisi vuorokautta, antoi se silti paljon tietoa tulevan koetalon tutkimusta varten.

Koeseinien rakentaminen onnistui hyvin. Timber-hirreltä tulleet asennusohjeet olivat selkeät ja apuna seinien rakentamisessa oli työkaverini Centriasta.

Lyhyen testin tehtyäni, voidaan todeta, että varsinaisessa koetalon tutkimuksessa seiniin kiinnitettävät anturit voidaan asentaa käyttäen pitempiäkin ruuveja. Pitempiä ruuveja käyttämällä ja antureita hieman hirsiin upottamalla saadaan koetalosta tutkimustuloksia hieman sisemmältä hirrestä. Ero pitemmän ja lyhyemmän ruuvien välillä on 55 mm ja lisäksi anturia upottamalla päästään jo CLT-osan liimapintojen sisäpuolelle. Koetalossa antureita olisi mahdollista asentaa eri syvyyksille. Mittalaitteisto toimi kaiken kaikkiaan hyvin ja ne olivat erittäin helppokäyttöisiä.

Hirsiseinien eroja saatiin myös hieman selville, vaikka tulokset voisivat heitellä suuntaan ja toiseen pitemmällä aikavälillä. Sisäilman puolella CLT-hirsiseinä on esitutkimuksen mukaan hieman normaalia hirsiseinää lämpimämpi ja kuivempi. Ulkoilman puolella lämpötilat olivat käytännössä samat kummassakin seinässä, mutta CLT-hirsiseinä oli muutaman prosenttiyksikön verran kuivempi kuin normaali hirsiseinä.

Jatkotutkimuksena CLT-hirsirakenteelle voitaisiin kehittää testiä erilaisilla ja muuttuvilla olosuhteilla. Jos testiaika olisi pidempi, voisi kosteutta ja lämpötilaa

muunnella niin, että seinärakenteeseen saataisiin lisää räsitus. Tässä tapauksessa olisi mahdollista todeta varmemmin, miten CLT-hirsirakenne toimii räsitus-tilanteissa. Jos esimerkiksi sisäilman suhteellista kosteutta saataisiin nostettua niin, että seinärakenteen kosteuspitoisuus nousisi ja tämän jälkeen sisäilman suhteellista kosteutta alennettaisiin, voisi saada kattavamin tietoa CLT-hirsirakenteen hygroskooppisuudesta.

Kaiken kaikkiaan odotan innolla tulevan koetalon tutkimusta ja sen tuloksia. Tämän opinnäytetyön pohjalta kirjoitetaan raportti vuoden 2018 kesällä, josta ilmenee CLT-hirsiseinärakenteen toimivuus asuinkäytössä.

LÄHTEET

AECB building knowledge 2017. OmniSense remote monitoring system. Llandysul: AECB. Viitattu 15.3.2017 <http://www.aecb.net/carbonlite/omnisense-remote-monitoring-system/>.

Autioniemi, J., Pirttinen, V. & Vatanen, M. 2016. CLT-koetalon rakennusfysikaaliset tutkimukset. Rovaniemi: Lapin ammattikorkeakoulu.

Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Building solutions 2013. New Mill Road Orpington: Stora Enso. Viitattu 15.3.2017 <http://www.clt.info/en/media-downloads/brochures/brochures/>.

Centria-ammattikorkeakoulu 2017. Viitattu 27.2.2017 tki.centria.fi.

CLT:n edut 2013. Helsinki: Stora Enso. Viitattu 27.2.2017 <http://www.clt.info/fi/tuote/clt-massiivipuukurakentaminen/cltn-edut/>.

CLT – ristiinliimattu massiivipuulevy 2011. Tekninen tiedote. Helsinki: Stora Enso. Viitattu 27.2.2017 <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/clt-ristiinliimattu-massiivipuu-cross-laminated-timber/clt.pdf>.

Gagnon, S. & Pirvu, C. 2011. CLT Handbook. Québec: FPInnovations. Viitattu 27.2.2017 <https://fpinnovations.ca/Pages/CLTForm.aspx>.

Hirsirakentaminen 2017. Vuokatti: Hirsitaloteollisuus Ry. Viitattu 14.3.2017 <http://www.hirsikoti.fi/fi/hirsirakentaminen>.

Hirsityypit ja perusprofiilit 2017. Helsinki: Puuinfo Oy. Viitattu 14.3.2017 <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakenteet/hirsityypit-ja-perusprofiilit>.

Karjalainen, M. 2016. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa. Puuinfo 29.12.2016. Viitattu 27.2.2017 <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakentaminen/puurakentamisen-asema-ja-mahdollisuudet-suomessa>.

Lindberg, R. 2003. Rakentajain kalenteri 2004. Rakennusosien rakennusfysikaalinen toiminta. Helsinki: Rakennustieto Oy.

OmniSense 2017a. Wireless Gateways. Ladys Island: OmniSense LLC. Viitattu 15.3.2017 <https://shop.omnisense.com/g-3-wireless-gateway-with-cellularoptional-wifi-and-ethernet>.

– 2017b. Wireless Sensors. Ladys Island: OmniSense LLC. Viitattu 15.3.2017 <https://shop.omnisense.com/s-2-wireless-sensor-with-2-ports-for-t-and-rh-wme-socket-and-64k-reading-datalogging-memory-03c20rh>.

Puurakentaminen 2010. Puurakentaminen on ratkaisu. Helsinki: Metsäteollisuus Ry. Viitattu 27.2.2017 <https://www.metsateollisuus.fi/mediabank/477.pdf>.

RT 05-10710. 1999. Kosteus rakennuksissa. Rakennustieto Oy.

Siikanen, U. 2016. Puurakentaminen. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.

LIITTEET

Liite 1. U-arvon laskentapohja

Buunnittelutoimisto	Työn nro	Sivu
X	X	1 / 2
	Päiväys	Tekijä
	14.3.2017	Hyväillä
Rakennuskohde	Sisältö	
CLT-hirsiseinä	U-arvon määrittäminen (SFS-EN ISO 6946)	

RAKENNEN TIEDOT

Info

TARKASTELTAVA RAKENNE: Puurakenteinen ulkoseinä (lämpövirran suunta vaakasuoraan)

RAKENNEKERROKSET

Sisäpinta

1 Hirsi

Kerroksen paksuus [d]	66,0 mm
Lämmönjohtavuus [λ]	0,120 W/mK

2 CLT

Kerroksen paksuus [d]	78,0 mm
Lämmönjohtavuus [λ]	0,110 W/mK

3 Hirsi

Kerroksen paksuus [d]	66,0 mm
Lämmönjohtavuus [λ]	0,120 W/mK

4 Ei rakennekerrosta

5 Ei rakennekerrosta

6 Ei rakennekerrosta

7 Ei rakennekerrosta

8 Ei rakennekerrosta

Ulkopinta

ILMARAKOJEN TIEDOT

Ulkopuolen tuuletusrako Ei tuuletusrakoa

Ilmarakojen korjaustekijä Korjaustaso 0

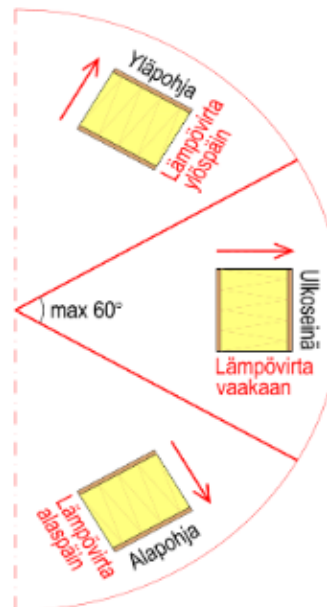
METALLISTEN MUURAUSSITEIDEN TIEDOT

Muuraussiteiden tyyppi Ei muuraussiteitä

KOOLAUKSEN TIEDOT

Koolauspuun leveys [b] Ei koolautusta

RAKENNE / LÄMPÖVIRTA



Suunnittelutoimisto	Työn nro		Sivu 2 / 2
X	X		
	Päiväys 42808	Tekijä Hyvärilä	
Rakennuskohde	Sisältö		
CLT-hirsiseinä	U-arvon määrittäminen (SFS-EN ISO 6946)		

